



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**Építészmérnöki Kar**  
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

**Válogatott héjszerkezetek, párhuzamok és hatások**

**Pier Luigi Nervi és Gnädig Miklós épületeinek szerkezeti elemzése**

Készítette: Szkiba Veronika (építészmérnök osztatlan)

Konzulensek:

Dr. Sajtos István egyetemi docens, tanszékvezető, BME Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Gáspár Orsolya PhD hallgató, BME Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Dobai János DLA egyetemi docens, tanszékvezető, BME Építészmérnöki Kar, Ipar és Mezőgazdasági Épülettervezési Tanszék

**Tudományos Diákköri Konferencia**

## Absztrakt

Esztétika és építés. Forma és technológia. Pier Luigi Nervi, a XX. század egyik legkiemelkedőbb szerkezettervezőjét kortársaihoz hasonlóan foglalkoztatta ez a kérdés. Különböző földrajzi és társadalmi közegben azonban eltérő válaszok születtek azonos problémákra.

Dolgozatomban Nervi tortonai sóraktárát (1950-'51) hasonlítom össze tartószerkezeti szempontból Gnädig Miklós két épületével, a Vörös Csillag Traktorgyár Új Szereldéjével (Budapest, 1962) és az egyik főműveként számon tartott kazincbarcikai "sóraktárral" (1952). A szerkezeti rendszerek elemzését végeसेlemes modellen végzett számításokkal ellenőrzöm, majd összehasonlítom a korabeli kézi számítási módszerek eredményét a mai végeसेlemes analízis eredményével. Az elemzésben kitérek a kézi módszerek hatékonyságának, a szerkezetek kihasználtságának kérdésére.

Nervi nagy hatású alkotó volt, akinek műveit a kortársai is jól ismerték. A magyar vasbeton héjépítészet azonban saját jogon is kiemelkedőt alkotott, a huszadik században komoly elméleti alapokra épülő héjépítészeti iskola alakult ki hazánkban. A század közepére Nervihez hasonlóan a magyar mérnöktársadalom érdeklődése is az előregyártásban rejlő technológiai és gazdasági előnyök felé fordult.

Nervi tortonai sóraktárának jelentősége kettős: fontos azért, mert Nervi életművén belül is beilleszhető egy fejlődési sorba (a monolit, majd bordákkal szabdalts monolit (Orvieto) szerkezeteken keresztül jut el a kiselemes, bentmaradó zsalus térlefedésig), illetve tipológiaiag nagyon erősen utal korábbi hasonló funkciójú raktárépületekre, ezzel lehetőséget ad a választott szerkezetek tágabb kontextusba helyezésére.

Gnädig Miklós, a magyar vasbeton előregyártás egyik leginvenciózusabb képviselője két épületével erősen kapcsolódik a tortonai sóraktárhoz. A kazincbarcikai műtrágyaraktár formailag a tortonai sóraktár rokona, azt primer szerkezetével (előregyártott vasbeton parabolikus ívszerkezet, ideiglenes állípotában háromcsuklós, de végleges állapotában kétcsuklós, vonórúd nélküli ívszerkezet) is megidézi. A Vörös Csillag Traktorgyár esetében pedig héjszerkezetének előregyártott, kiselemes, bentmaradó zsaluzatként szolgáló elemei szolgálnak analógiaként.

## Tartalom

Bevezetés .....	5
Héjszerkezetek .....	6
Mérnöki héjszerkezetek .....	6
Membránelmélet .....	7
Nagyfeszítávú ív-, héjszerkezetű csarnokok.....	9
Pier Luigi Nervi .....	10
I. Monolit korszak .....	10
II. Ferrocement elemek.....	11
III. Geometriai változás .....	12
Magyarország ipari épületeinek alakulása a XX. Század második felében.....	13
I. Monolit vasbetonszerkezetek.....	13
II. Helyszíni nagyelemes előregyártás .....	14
III. Kiselemes előregyártás, helyszíni monolit öszvérszerkezet .....	15
Nervi és a magyar héjépítészet.....	18
Gnädig Miklós .....	20
Technológiai fejlődés – Héjszerkezetek vizsgálata .....	20
Kazinccarcikai Sóraktár (1952) .....	20
Újpesti Börengygyár (1954).....	21
„Vörös Csillag” Traktorgyár Új Szereldéje (Budapest, 1962).....	22
Tihanyi vasbeton héjszerkezetű pavilonépület (1962).....	22
Az elemzett épületek.....	23
Sóraktárak tipológiája .....	23
Monolit szerkezetek .....	23
Előregyártott szerkezetek .....	23
Pier Luigi Nervi - Tortona, Sóraktár (1950-1951).....	25
A szerkezet ismertetése .....	26

Az ívszerkezet alakjának optimalizálása.....	27
Felső csomópont vizsgálata .....	29
I. Nyomatékok számítása – különböző merevségek mellett .....	29
II. Keresztszmet ellenőrzése .....	30
Vörös Csillag Traktorgyár (1962) .....	33
A szerkezet ismertetése .....	33
Kedvező geometria, kiselemekkel történő közelítés.....	34
1. Rhino – Grasshopper alkalmazása .....	34
2. Rhino – Eve_voronax plug-in alkalmazása.....	36
3. Rhino – Grasshopper alkalmazása – optimális elemméret keresése Kangaroo-val .....	36
Összegzés.....	38
Köszönetnyilvánítás.....	38
Források .....	39

## Bevezetés

*„The relationship between the economics of architecture and its aesthetic expression is more difficult to define, but in my opinion its existence is confirmed by countless observations.”*

Pier Luigi Nervi

Pier Luigi Nervi a XX. század egyik legjelentősebb alkotója volt. Sokszor hangoztatta alapelvét, miszerint az épületnek esztétikája, szépsége önmagában kevés, a szerkezet helyességével együtt képes egy jó épület megszületni.

Tanulmányaim során ezt a szemléletet tőle hallottam először, így amikor tavaly tél végén lehetőségem volt rá, bekapcsolódtam a Nervi kiállítás előkészítésébe, munkájába, mely Nervi magyarországi hatását kutatja.

A dolgozat célja e kettősség végig követése, az épületek formai, technológiai fejlődésének vizsgálatán túl Gnädig Miklós 2 épületét mai számítási módszerekkel elemzem. A szerkezetek vélt erőjátékának vizsgálati módszereit hasonlítom össze: a mai szoftveres modellezést a korabeli kézi számításokkal, modellkísérletekkel.

## Héjszerkezetek

A szerkezettervezésnek alapvetően két, többé-kevésbé elkülöníthető szemléletű szerkesztési elve van: a hierarchikus – más néven hagyományos szemléletű szerkesztési elv, illetve az integráló szerkesztési elv.

A mai napig meghatározó szerepe van a hierarchikus szemléletű szerkesztési elvnek: ez az épületszerkezeteket két csoportra osztja: a teherhordó- és a nem teherhordó szerkezetekre.

Az egyre pontosabb anyagismeret, az újfajta anyagok, illetve a fejlődő gyártási és kivitelezési technológiák mellett nagyobb szerepet kap a gazdaságosság, így a hierarchikus rendben különböző osztályba tartozó teherhordó elemek összevonásával létrejöttek az úgynevezett integráló szerkezetek: rácsostartók, keretszerkezetek, bordás födécek, gombafödémek és többek között a héjszerkezetek.

Az integráló szerkesztési elv kialakulásában, majd annak fejlődésében nagy szerepet játszott F. Hennebique francia mérnök, aki több éven át tanulmányozta a vasbeton szerkezetek együttműködését. Az integrált szerkezetek méretezését a hierarchikus szemléletű szerkesztési elv nyomán, közelítéseket tartalmazó méretezési eljárásokkal alakították ki. Később olyan méretezési eljárások jelentek meg, melyek nem próbálták visszavezetni az integrált szerkezetek erőjátékát a hierarchikus szerkezetekre, így pontosabb, gazdaságosabb épületek születhettek meg. A mai gyakorlatban a számítógépes tervezés mellett az utóbbi típusú számolások a meghatározóak, gyakran a számítógépes tervezés ellenőrzése végett alkalmazzák őket.

### Mérnöki héjszerkezetek

A műszaki gyakorlatban nagy szerepe van a felületszerkezeteknek, ezek két nagy csoportja a sík- és a térbeli felületszerkezetek.

A sík felületszerkezetek közé tartozik a tárcsa (tábla), ez sík középfelülettel rendelkezik, mely terhelés során is megtartja eredeti sík alakját, miközben a középfelület hosszváltozást szenved. A terhelés során keletkező belső erők a középfelülettel párhuzamos membránerők (normál-, nyíróerők).

A sík felületszerkezetek másik jellegzetes csoportját a lemezek adják, melyek sík középfelülettel rendelkeznek, a középfelületre merőleges külső erők belső hajlítóerőket ébresztenek (nyíróerő, hajlító-, csavaró nyomatékok).

A héjak olyan térbeli felületszerkezetek, melyek középfelülete egy vagy két irányban görbe felület. A szerkezetben a külső erők hatására membrán- és hajlítóerők is ébredhetnek. Azon héjakat, melyekben nem, vagy elhanyagolható mértékű hajlítóerők terhelnek membránhéjaknak, amiben ezek nem elhanyagolhatók, hajlított héjaknak nevezzük.

A hajlítónyomatékkal nem terhelt (héjak esetében membránerők, rúdszerkezetek esetében húzó/nyomóerők) szerkezetek lényegesen kevesebb anyag felhasználásával megvalósíthatók, mint a hajlított szerkezetek –így anyagtakarékosak, gazdaságosak. A héjszerkezetekben ébredő membrán- és hajlító igénybevételek aránya függ a héj geometriájától, a terhelés jellegétől és a megtámasztástól. A membrán erőjáték előnyei miatt a mérnöki gyakorlat törekszik a membránhéjak kialakítására: ennek kulcsa a megfelelő alak meghatározása és a megtámasztások helyes kialakítása. A membránhéjak anyagtakarékosság, gazdaságosság szempontjából is kedvezőbbek.

A fentiek alapján elmondható, hogy a héjak erőjátékában kiemelt szerepe van a geometriájuknak, az alapján lehet erőjátékukat pontosan meghatározni. E szerint beszélünk paraboloid (parabolikus, elliptikus, hiperbolikus) és torznégyszög héjakról.

## Membránelmélet

A membrán igénybevételek a tárcsa-igénybevételek mintáján 3 matematikailag egymástól független függvényvel írhatóak le:  $N_\xi, N_\eta, N_{\xi\eta} = N_{\eta\xi}$

A héjak görbült felületén értelmezett  $\xi - \eta$  derékszögű koordinátarendszer koordináta vonalai görbék, ezen koordinátarendszerre való áttérés akkor érdemes, ha egyszerűen megállapítható a héjfelületen egy főgörbületi (természetes) koordinátarendszer, melynek vonalai a főgörbületek. Ez forgásfelületek esetén áll fenn, általános esetben úgynevezett redukált metszeterők bevezetése célszerű. Redukált metszeterők alatt a héj síkjában fellépő erők vízszintes alapsíkra történő vetítését értjük.

Nincsen az az előny a membránhéjaknál, hogy nem kell az elmozdulásokkal operálni?

Membránelmélet alkalmazásának korlátai

- perem-megtámasztások építészeti kérdése
- a membrán - és a peremtartó alakváltozásainak egymásra hatását elhanyagolja (peremzavarok)

- nem alkalmas a stabilitásvesztés leírására, héjhorpadásra nem lehet méretezni ezzel a módszerrel

A héjak görbült felületén értelmezett  $\xi - \eta$  derékszögű koordinátarendszer koordináta vonalai görbék, ezen koordinátarendszerre való áttérés akkor érdemes, ha egyszerűen megállapítható a héjfelületen egy főgörbületi (természetes) koordinátarendszer, melynek vonalai a főgörbületek. Ez forgásfelületek esetén áll fenn, általános esetben úgynevezett redukált metszeterők bevezetése célszerű. Redukált metszeterők alatt a héj síkjában fellépő erők vízszintes alapsíkra történő vetítését értjük.

Mivel a membránszerkezetek statikailag határozottak, ezért megvan az az előnyük is, hogy elmozdulásokat nem kell számítani.

Membránelmélet alkalmazásának korlátai

- perem-megtámasztások építészeti kérdése
- a membrán - és a peremtartó alakváltozásainak egymásra hatását elhanyagolja (peremzavarok)
- nem alkalmas a stabilitásvesztés leírására, héjhorpadásra nem lehet méretezni ezzel a módszerrel



## Nagyfeszítávú ív-, héjszerkezetű csarnokok

Az építészetben a héjszerkezetek, mint boltozatok, évezredek óta jelen voltak, ám ezek húzóerőket nem tudtak felvenni, méretezési lehetőségüket sem ismerték. A rómaiak idején a centrális tereket már kupolákkal fedik le, de a héjszerkezetek fejlődése, virágkora a vasbeton építészet megjelenésével egyben a modern mérnöki megközelítés elterjedésével kezdődik.

A héjelmélet alapját a XX. sz. elejéig Mariotte egyszer görbült felületre kidolgozott kazánképlete adta, egészen addig, míg egymástól függetlenül H. Zimmermann és M. Milankovich is általánosította azt kettős görbületű héjfelületekre.

Az ipari termelés volumenének növekedése, a közlekedési létesítmények és nem elhanyagolható módon a hadiipar század eleji élénkülése mind hozzájárultak a nagyfeszítávú szerkezetek iránti fokozott igényhez. Az új anyag, a vasbetonban rejlő lehetőségek fokozatos megismerése szerencsésen találkozott a fenti igénnyel, és megindult a héjszerkezetek rohamos fejlődése. Kezdetben még mérnöki számítások nélkül, majd a számítási módok kidolgozásával párhuzamosan, illetve később azok alapján egyre több vasbeton héjszerkezet épült meg világszerte.

## Pier Luigi Nervi

1891. június 21-én született Sondrióban, Olaszországban. Középiskolai tanulmányai után a bolognai egyetemre ment, 1913-ban szerezte meg mérnöki diplomáját. Az első világháború után leszerelt, Bolognában, Firenzében dolgozott. Az 1920-as években saját mérnöki irodát alakított, mely Nervi és Nebossi néven indult, később Nervi és Bartoli néven vált ismertté. 1947-től a római egyetemen tanított, fiai követték őt a pályáján. 1979. január 9-én halt meg.

Nervi épületein végigkövethető az új anyaggal (vasbeton), új feladatokkal (nagy fesztávú csarnokok, íves szerkezetek) való kísérletezés. Nervi életművének értelmezéséhez fontos adalék, hogy szerkezettervezői pályafutása előtt hajótervezőként is dolgozott. Az ott alkalmazott szerkezeti logika, valamint a ferrocement, mint alapanyag megismerése közvetlen hatást gyakorolt későbbi, invenciózus szerkezeti megoldásaira.

A ferrocement nagyobb cementtartalmú, finom adalékanyagú, hálórősített szerkezet, melyben a feszültségek egyenletesebben oszlanak el, anyagtulajdonságai kedvezőbbek a vasbeton szerkezeteknél, kis szerkezeti vastagság hozható létre vele.

Nervi első jelentős munkája egy nápolyi mozi, ám a hírnevét az 1930-'32 között tervezett-épített firenzei Artemio Franchi Városi Stadion hozta meg. Az épület vasbeton lemezekből, gerendákból épült még, de a lépcső, lelátó szerkezete már újszerű kialakítású volt.

### I. Monolit korszak

#### Orvieto-i hangárok

Az első szerkezetileg jelentős épületei 1935 és 1939 között születtek, az Orvieto közelében megépült repülőgéphangárok. A legelső hangár még acél szerkezetű, de ezután már vasbetonból készíti épületeit. Kezdetben a vasbeton bordázat, illetve a tető is monolit kialakítású, a zsaluzat még hagyományos típusú.

A későbbi hangárok elvi felépítése, a parabolikus szerkesztés megmarad, ám a szerkezet átalakul: a természetes megvilágítás miatt rácsos tartóként voltak kialakítva a bordaelemek, melyeken a tetőelemek már előregyártott ferrocement szerkezetűek voltak, csomópontjaik a kilógó vasak összehegesztésével, majd kibetonozással készültek. A megtámasztások még monolitikus kivitelezésűek. Nervi a számolás pontosságát kísérletekkel is ellenőrizte.

Nervi, tekintettel arra, hogy teljesen újszerű geometriájú, alakú szerkezeteket tervezett, ezeket kísérletekkel vizsgálta, melyekhez saját laborral rendelkezett. A tapasztalati szerkezettervezés – modellkészítés másik két gyakorlója Heinz Isler és Frei Ottó volt.



1.kép: Orvietoi hangár

## II. Ferrocement elemek

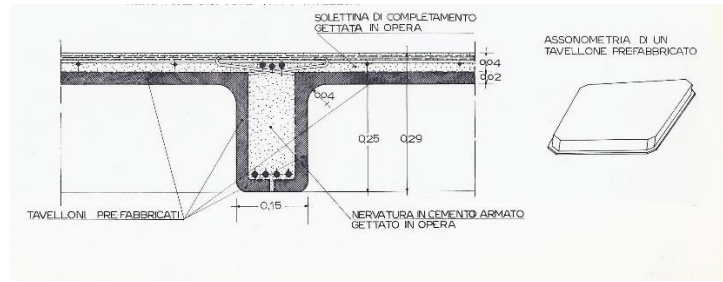
Az előregyártás előnyeinek megtapasztalása, a gazdaságosság, a kivitelezés felgyorsítása, a zsaluzat minimalizálása útján jut el Nervi a következő felismeréshez, mely egész munkásságát alapvetően meghatározza: a bordás héjak alkalmazásának előnyeire: kis szerkezeti vastagság, merevítő bordák, előre gyártható elemek. Ezek fejlődése a komplikáltabb egységektől az egészen egyszerű elemekig megfigyelhető az alábbi épületein.

### Torinó, Kiállítási csarnok (1947-48)

A 95m fesztávolságú ívszerkezet előregyártott, hullám formájú íves elemekből készült, melyek részben a térelhatárolás funkcióját töltik be, részben pedig a belőlük kiálló vasak biztosítják az együttdolgozást az utólagos, teherhordást biztosító kibetonozással. A hullámelemek egy része a felülvilágító szerepét is betölti. Az épület végén elhelyezkedő félkupola hasonló szerkezettel, ám más alakú, méretű panelekkel készült el.

### Torinó, C kiállítási csarnok (1949-50)

A repülőgéphangárokhoz mind geometriájában, mind méreteiben hasonlító torinói csarnokoknál már a később védjegyévé vált, az orvieto-i hangároknál megalapozott technológiát alkalmazta, szerkesztése letisztultabb az első kiállítási csarnokénál. A 65, 75m oldalhosszúságú csarnok lefedése bentmaradó zsaluzatként használt előregyártott, kiselemes rombusz ferrocement panelekből készült, utólagos kibetonozással. A bentmaradó zsaluzaton túl az épület alsóíves szerkezete monolit kivitelezésű.



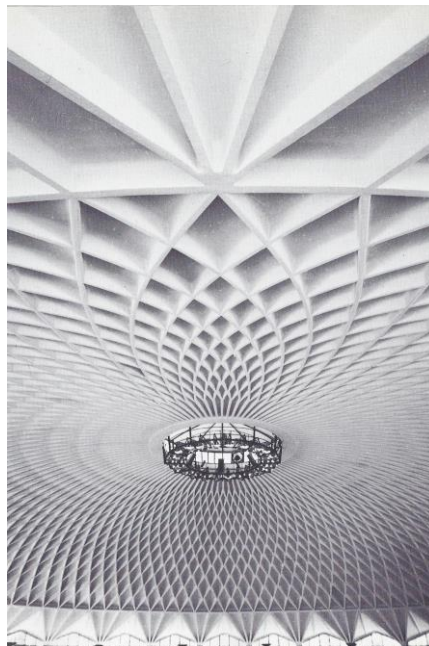
2. kép – ferrocement tetőpanel

### III. Geometriai változás

Az előregyártott, ferrocement elemek variálásával egyre több fajta geometriai megoldás születik Nervitől, melyek már nem csupán tengelyesen szimmetrikusak, de több koncentrikus térlefedést is tervez az évek során.

#### Kis Római Sportpalota (1956-1957)

Nervi egyik legjelentősebb műve. A héjszerkezet 36 darab Y-alakú megtámasztásra terhel. A térlefedő szerkezet 59,20m, maga az épület pedig 78,5 m átmérővel rendelkezik, a belső tér legmagasabb pontja 21m. A héjszerkezet 1620 előregyártott panelből áll, melyek vastagsága 2,5cm, a bordák 4 cm magasak. A kupolaszerkezetet, mint membránhéjat számították. Egy évvel később a szerkezet sikere miatt Nervi tervezhette meg a Nagy Római Sportpalotát (1958-1960), melynek szerkezete, formája is sok szempontból hasonlít a Kis Sportpalotáéra.



3. kép: Római Kis Sportpalota

## Magyarország ipari épületeinek alakulása a XX. Század második felében

### I. Monolit vasbetonszerkezetek

Az első világháború (1914-1918) után Magyarország építészetét két fontos sajátosság határozza meg: a jelentős károkat szenvedett hazai épületállomány rehabilitációja mellett az ország vezetése a hadipar támogatását tűzi ki céljául. Ez utóbbi következtében megnőtt az igény a nagyméretű épületek, csarnokok építésére. A léptékváltozás következtében új technológiák, szerkezetek terjednek el. A nagy fesztávú épületek kialakításában tért nyer a monolit vasbeton szerkezetek alkalmazása, melyet a rendelkezésre álló nyersanyag, illetve a zsaluzathoz szükséges fa biztosított, bár a Trianoni békeszerződés (1920. jún.4.) után az ország erdőterületeinek jelentős részét elvesztette.

A XX. század elején mind a héjelmélet, mind a vasbeton építészet fejlődésében jelentős szerepet játszottak a magyar mérnökök, köztük Kármán Tódor, Hoff Miklós, Zielinski Szilárd, Lipták Pál stb.

A héjelmélet első, nemzetközileg is elismert kutatója Menyhárd István (1902-1969) volt. Az általa tervezett korszakalkotó épületeken túl elméleti területeken is jelentős sikereket ért el – a törésméletre alapozott 1951-es vasbeton szabályzat is hozzá köthető.

A kor másik jelentős alakja Csonka Pál (1897-1988), aki Menyhárdhoz hasonlóan egyetemi tanár volt. A membránelmélet vizsgálati módszerének kutatása, könyvek, cikkek köthetőek nevéhez, a nemzetközi konferenciákon rendszeres előadó volt.

Csonka Pál tanítványa, Pelikán József (1913-1968) a hártyszerkezetek elméletének kidolgozója szintén jelentős elméleti eredményeket ért el, csak úgy, mint a további számos magyar, magyar származású kutatók.

Az elméleti tudás mellett az ekkor létrehozott épületek szerkezetileg, technológiájukban is a nemzetközi színvonalat képviselik, sőt olykor meghaladják azt.

Obrist Vilmos (szerkezettervező) – Münnich Aladár (építész) – Nagyvásártelep áruccsarnok, 1933

Menyhárd István (szerkezettervező) – Padányi Gulyás (építész) – Kelenföldi autóbuszgarázs, 1941

## II. Helyszíni nagyelemes előregyártás

A második világháború, illetve az azt követő hatalmi változások folytán új célok fogalmazódtak meg. A kommunista hatalomátvétel (1947.), majd a Magyar Népköztársaság megalakulása (1949. aug. 20.), a kommunista rendszer kiépítése folytán az újjáépítés, illetve a hadipar támogatása mellett egy erőteljes iparosítás veszi kezdetét, mely gazdasági és ideológiai szempontból volt fontos cél a szocialista országoknak.

Az első hároméves terv (1947. aug. 1.) fő célkitűzése a ipar 27%-kal való fejlesztése (1938-as viszonyokhoz képest), melyben szerepet játszott a hidegháború okozta háborús készülődés, felfegyverkezés is. Ez, és az államosítások következtében a Minisztertanács 1948. december 5-én létrehozza az IPARTERV-et, akkori nevén az Ipari Épülettervező Intézetet, az ITI-t.

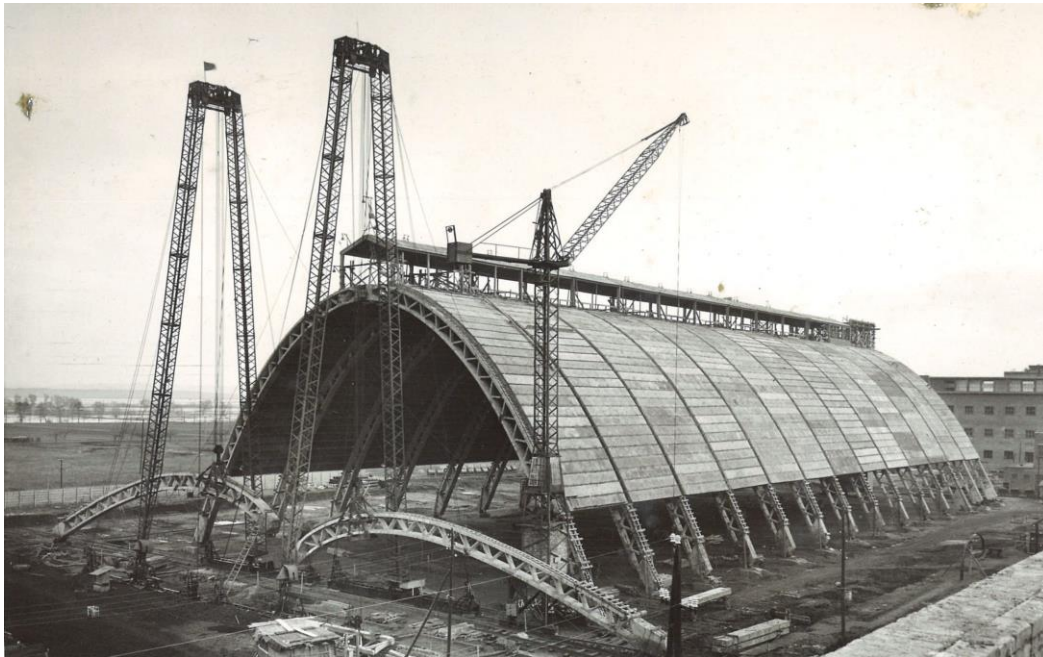
Az első hároméves tervet az első ötéves terv követi (1950.), melyben 44%-os növekedést fogalmaznak meg az iparra, a tervszámokat 1951-ben tovább emelik. Változást Sztálin 1953-as halála hozta, még ebben az évben Nagy Imre leállítja a nagyberuházásokat, helyette a lakásépítést, mezőgazdasági építkezéseket indítanak el.

A kommunista szemlélet mellett azonban a nyersanyagok jelentősen megfogyatkoztak a háború előtti viszonylatokhoz képest: a háború és a hadipar felemésztette az ország acél készleteit, külföldről sem jutott hozzá jelentős mennyiséghez, illetve a fa, mint nyersanyag is csak korlátozott mennyiségben volt elérhető a párizsi békeszerződés után (1947. február 10.).

Ezen tényezők mellett legalább annyira fontos volt az is, hogy Magyarország rendelkezett egy világszínvonalú szellemi tőkével. Mind a mérnöki tudás, mind a jól képzett munkaerő szükséges volt ahhoz, hogy a kedvezőtlen gazdasági, politikai viszonyok mellett óriási léptékű építési feladatok valósulhattak meg.

A fenti három tényező együttállásából megszületett a helyszíni nagyelemes előgyártás, a későbbi üzemi előregyártás előfutáraként. . A feladatok léptéke, egyedisége, a rendelkezésre álló technológia még nem tette lehetővé az utóbbit (kivitelezéstechnológiai visszaesés a háború, ill. az államosítások miatt, nincs folytonosság, mint nyugaton). A zsaluzatok többszöri felhasználása, az állványzatok minimalizálása, csúszózsaluzatok megjelenése mellett nagy szerepet kapott az épületek alakjának legoptimálisabb megválasztása is, melyet az építészek a szerkezettervezőkkel együtt határoztak meg. A gazdaságosság vezetett tehát ahhoz, hogy egyre több héjszerkezet jelenik meg, mivel bizonyos fesztáv felett már ezt találták a legalkalmasabbnak.

A korszak meghatározó vállalata az Ipari Épülettervező Vállalat, mely ezen a néven 1951-től létezett. A magyar ipari épületek jelentős részét a vállalat építészeti-szerkezettervezői tervezték. A nagyelemes helyszíni előregyártás 4 nagy erőműve: Inotai (1950-'54), Berentei (1951-'57), Tiszaapalkonyai (1952-'59) és a Pécsújhelyi Erőmű (1955-'66). Ez utóbbinál a tetőelemek már héjszerkezetek. Gnädig Miklós Kazincbarcikai Sóraktára is ebben az időszakban keletkezett.



4. Kép – Kazincbarcikai Raktár

### III. Kiselemes előregyártás, helyszíni monolit öszvérszerkezet

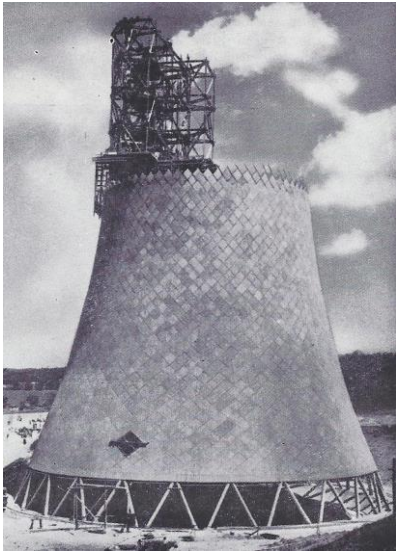
A nagyelemes helyszíni előregyártás elterjedése mellett, azzal párhuzamosan az 1960-as évekre megjelenik a kiselemes előregyártás. Magyarországon ez kevésbé tudott elterjedni, a többi európai országhoz képest, részben az iparosodás átalakulása, részben az 1956-os forradalom következtében. Mindazonáltal a nehézipar háttérbe szorulásával más iparágak kerültek előtérbe, így az építőipar, építőanyagok gyártása, azaz megjelent az üzemi előregyártás is.

A kiselemes technika segítségével már többször görbült felületek is létre tudtak jönni, s bár ezt a módszert hazánkban térlefedés céljára – néhány kivételt leszámítva – nem, de hűtőtornyok építésére már gyakrabban alkalmazták:

Mátrai Gyula : Ajkai -, Debreceni hűtőtorony

Homonnai Tamás ( Iparterv) :Több kiséleemes hűtőtorony

Gnädig Miklós – Vörös Csillag Traktorgyár



5. kép: Ajkai hűtőtorony



## Párhuzamok és hatások – környező országok héjépítésze

Bár az ország vezetése politikai okokból a nyugati, kapitalista országokkal való kapcsolatot minimalizálni szeretne volna, a szaklapok, folyóiratok, részben a háború előtt kialakult kapcsolati hálókat folyományaként egész Európából érkeztek Magyarországra, ezzel lehetővé téve a magyar mérnököknek a nemzetközi fejlődés folyamatos követését.

A folyóiratok mellett az IASS (International Association for Shell Structures – Nemzetközi Héjszerkezeti Egyesület) rendszeresen megrendezett nemzetközi kongresszusai biztosították a fórumot a tervezők találkozására, tapasztalatcserejére. Ezen rendezvényeken magyar tervezők, kutatók is gyakran adtak elő. Fontos megjegyezni, hogy Magyarországon a havi rendszerességgel megjelenő folyóiratok (Magyar Építőipar, Magyar Építőművészet) ezekről az eseményekről beszámoltak, az összefoglalók mindenki számára elérhetőek voltak:

Dr. Kollár Lajos – Beszámoló a varsói héjszerkezeti kongresszusról (1963)

*(Nem klasszikus héjszerkezeti problémák)*

Dr. Csonka Pál – A membránhéjak problémája a budapesti IASS szimpóziumon (1965)

*(Egyszerűsítések a héjépítészetben, tervezés – kivitelezés során)*

Dr. Csonka Pál – Beszámoló a pozsonyi IASS szimpóziumról (1966)

*(Toronyszerű szerkezetek – többek között hűtőtornyok – szerkesztési, számítási, kiviteli problémái)*

Dr. Csonka Pál – A Leningrádi Héjszerkezeti Szimpózium tanulságai (1966)

*(Ipari és középületek céljával szolgáló nagyfeszítésválasztású héjak tervezési és kiviteli problémáinak, ezek összefüggéseinek tanulmánya)*

Az IASS-nek volt hazai szervezete, melynek tagja volt többek között Kollár Lajos, Csonka Pál és Dulácska Endre is.

A korábban említett okokból mindazonáltal a kommunista országokkal volt a legszorosabb a viszony, a legtöbb információt ezekről a területekről kapta Magyarország, Nem ritka, hogy bizonyos nyugati hatások vélt vagy valós közvetítéssel valamelyik baráti ország példáján keresztül vált hazánkban ismertté.

A Szovjetunióban elterjedté vált egy Nervi módszeréhez hasonló eljárás: gyárilag előállított elemekből tudtak szabványos méretű csarnokokat építeni. Ezek az elemek nagyban hasonlítottak a Nervinél már ismertetett elemekhez: vékonyfalú, bordázott „héjelemek”, ám

alátámasztásukat acél állványzattal oldották meg a Szovjetunióban. Maga a kivitelezés is hasonló az olasz módszerhez, a kiálló acélbetéteket hegesztéssel rögzítik, majd kibetonozzák a szerkezetet.

Ezt az építési módot egyrészt a gazdaságosság, másrészt a szélsőséges éghajlati viszonyok tették szükségessé, hisz ezáltal a helyszíni munka ideje lerövidíthető volt. Magyarországon ezen típus elterjedését a már említett tényezők (iparosodás lecsengése, forradalom kitörése) mellett a fejlett üzemek hiánya gátolta.

Boriszpoli repülőtér felvételi épülete

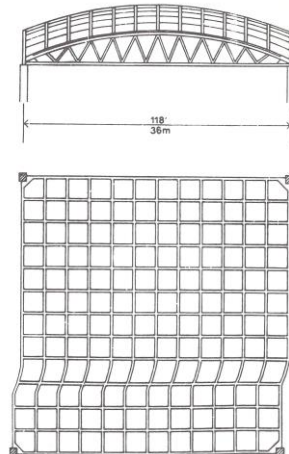
Szűasszi papírművek üzemi épülete (6. kép)

További épületek:

Rheinbergi Solvay-Werke csarnok

Íves csarnok Csehszlovákiában

Ammóniumszulfát-tároló csarnok, Krefeld (lsd.: Sóraktár tipológia)



Nervi és a magyar héjépítészet

A kelet-európai példák mellett meg kell említenünk Nervi hatását is. Ismerték magyar kortársai, és nagyra is tartották őt. Ezt mi sem mutatja jobban, mint az, hogy a Harvard Egyetem mellett a Műegyetem is Díszdoktorává avatta, az Építészmérnöki Kar felterjesztésének köszönhetően.

A IASS szervezésében megrendezésre kerülő kongresszusok előadói között gyakran feltűnt Nervi, elismertsége egyértelmű volt:

„E témakörben nagy érdeklődés kísérte Nervi P. L. professzornak, a világszerte megcsodált római kis és nagy sportcsarnok tervezőjének referátumát, mely részletesen beszámolt az építményein alkalmazott különleges kiviteli eljárásról, az előregyártott héjelemek készítmódjáról...”

(Mélyépítéstudományi Szemle - 1967. 2. szám - Dr. Csonka Pál – A Leningrádi Héjszerkezeti Szimpózium tanulságai)

Ezenkívül a magyarországi héjszerkezetekről szóló írások, könyvek, összefoglalók majd' mindegyike említést tesz az olasz konstruktőről. Érdekes, hogy a korabeli folyóiratok a nyugati tervezőket a legritkább esetben nevesítik (még ha az épületet ismertetik is), kivételt képez viszont Nervi, aki, a fentiekhez hasonlóan legtöbbször a professzor titulust is kiérdemli: Mók László – Helyszíni előregyártás (Budapest, 1961) c. könyvében 2 fejezetet is ír Nervi munkáiról: Római rácsos-lamellás szerkezetű hangár, Torinói kiállítási csarnok címen.

## Gnädig Miklós

"Szakmai téren elsősorban a szerkezettervezés volt az a terület, amelyben csodáltuk és nagyra tartottuk őt, mert megvolt benne az invenció, a fantázia, a szerkezet helyes megválasztásának a képessége az ehhez szükséges ismeretekkel és áttekintéssel, és megvolt benne a szívósság is elképzeléseinek megvalósításához, a műszaki feltételek biztosításához."

Kollár Lajos

1908. március 23-án született Erdélyben, marosvásárhelyi érettségije után tanulmányait 1927 és 1932 között a Budapesti Műszaki Egyetem Általános Mérnöki Karán folytatta.

Diplomájának megszerzése után különböző, vasbetonnal foglalkozó építő vállalatoknál dolgozott, munkája során a szerkezettervezéstől a gazdaságos műszaki megvalósításig kíséri nyomon az épületeit.

A második világháború után részt vesz az épületek rehabilitációjában: gyors ütemben, általános anyagihiány mellett kellett egyszerű, célravezető megoldásokat találnia.

Az államosítás következtében végül 1949. márciusában kerül a Nehézipari Épülettervező Irodához, a NEHÉZIPARTERV-hez, melyet később az IPARTERV-hez kapcsolnak, ott is dolgozik nyugdíjazásáig, 1982-ig.

1978-1982 között statikus szakági főmérnök az IPARTERV-nél, ahol sok kezdő mérnököt indított el pályáján.

1993-ban Marosvásárhelyen, életének 85. esztendejében halt meg.

### Technológiai fejlődés – Héjszerkezetek vizsgálata

Az IPARTERV-hez kerülése után számos nagyméretű épület tervezésében, kivitelezésében vett részt.

#### Kazincbarcikai Sóraktár (1952)

Az elkészült raktárépület, bár számos külföldi előképpel rendelkezik, méreteit, szerkezetét nézve is kiemelkedő Magyarországon (A Dywidag cég pétfürdői sóraktára a 1930-as évekből talán az egyetlen korábbi hazai példa). A helyszíni nagyelemes előregyártással készült

csarnokról az alábbiakban bővebben lesz szó, Gnädig Miklós tervezéséért, kivitelezéséért Kossuth-díjat kapott.

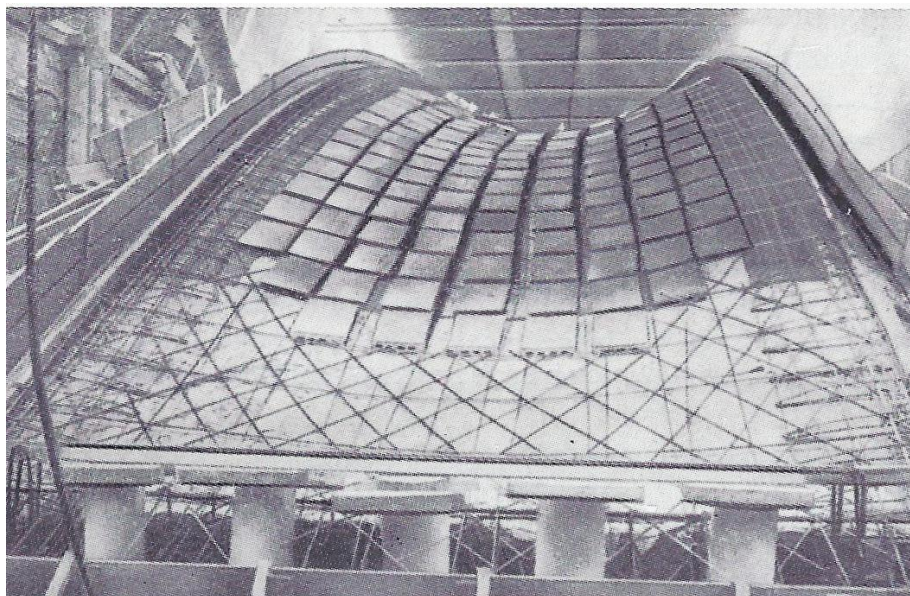
### Újpesti Bőrenyvgyár (1954)

Az épület kettősgörcbületű, hiperbolikus paraboloid alakú nyereghéj szerkezet, 19 m fesztávolságú, 3,2 m széles egységekből épült fel. Az elemek kisméretű 3,5 cm vastag, 21/30cm oldalhosszúságú üreges kábeltégla-betétekkel készültek, a köztük levő 2,5 cm hézagot kibetonozták. A héj vastagsága a végbordák, peremek irányában fokozatosan nő, míg eléri a 10cm vastagságot.

A szerkezet alakjának előnye kettős: kihajlási merevsége optimális, mivel keresztirányban húzófeszültség, hosszirányban nyomófeszültség keletkezik csak, illetve zsaluzása egyenes elemekből is megoldható volt, mely jelentősen leegyszerűsítette a kivitelezést. Ezen kívül zsaluzatát többször fel lehetett használni, és mivel az elemek borda nélkül készültek, könnyen lehetett a sablontól elválasztani őket.

A kivitelezés során keletkező többlet igénybevételek elkerülése végett a felső záradék csuklós kialakítású volt, így a szerkezet háromcsuklós vonóvasas ívként viselkedett.

Bár a szerkezet elemeinek anyaga, formája, valamint a háromcsuklós, vonóvasas kialakítás később meghaladottá vált, az épület elvi átgondoltsága, szerkesztése korát megelőzi, nemzetközi téren is kevés ilyen kivitelezésű térlefedés készült.



7.kép: Újpesti Bőrenyvgyár

„Vörös Csillag” Traktorgyár Új Szereldéje (Budapest, 1962)

A Traktorgyár szerkezete jelentős újítást hozott a Börenyvgyár szerkezetéhez képest: a parabolikus héj elemei a Nervinél bemutatottakhoz hasonlóan előregyártott kiselemes beton panelek voltak, ezekre rábetonozással készült a héj, így vált teherhordóvá a szerkezet. Az épület részletesebb elemzésére később kerül sor.

Tihanyi vasbeton héjszerkezetű pavilonépület (1962)

Az 1960-as években több Balaton környéki fejlesztés indult el, melynek egyik épülete az egykori Idegenforgalmi és Postahivatal a bazársorral 1962-ben épült, építész tervezői: Bérczes István és Szittyá Béla volt, szerkezettervezője Gnädig Miklós. A pavilon-szerű épület szerkezete három ponton van megtámasztva, szerkezete monolit vasbeton héj. Mind formailag, mind méretében, mind pedig technológiájában kivételnek számít Gnädig feladatai között, bizonyos fokig a magyar héjépítészetnek is atipikus példája – azonban nagyon is balatoni, hiszen az egész korszakra jellemző volt a Balaton-környék megkülönböztetett kezelése: kicsiben, de építészeti (és szerkezetileg) is szabadabban lehetett gondolkozni.

## Az elemzett épületek

Az alább választott épületek a magyar héjépítészet többé-kevésbé önkényesen kijelölt szeletét jelentik. A kutatásunk számára fontos volt, hogy ezek esetében igen szoros, jól kimutatható kapcsolatot találtunk Nervi munkásságával, melyből az egyszerűség kedvéért a Tortonai Sóraktárat emeltük ki – ez az egyébként kevésbé populáris épülete jól illusztrálja Nervi érett tervezői korszakát. Ugyanakkor a bemutatott szerkezetek magyar szerkezetfejlődés izgalmas állomásaiként is értelmezhetőek. Nem mellesleg egy kiváló szerkezettervező életművének két fontos, gondolkozását jól dokumentáló művéről van szó.

## Sóraktárak tipológiája

A vegyipar fellendülésével a XX. században sok olyan üzem épült, melynek elengedhetlen részét képezték a sóraktárak.

### Monolit szerkezetek

A vasbeton építészeti felhasználásának fejlődésével párhuzamosan először monolitikus szerkezetekkel készültek. Magyarországon egy ilyen példa épült: felülbordás dongahéj szerkezetként, amit azonban később vasszerkezettel építettek újra. Ennek méretei még kisebbek voltak.

A kazincbarcikai raktárhoz hasonló méretben ammóniumsulfát raktárt készítettek Indiában, Sindri-ben, ám ennek szerkezete még mindig monolit, külső-belső gördülő csővasszerkezeti állványzattal, csúszózsákkal készítették. (1950)

### Előregyártott szerkezetek

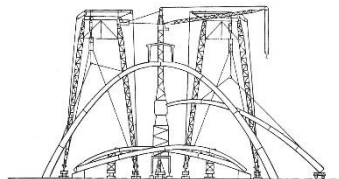
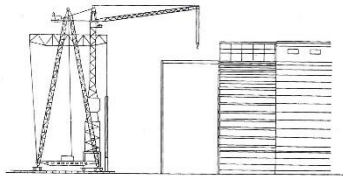
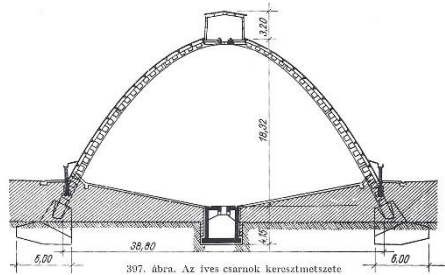
Olaszországban már az 1950-es években épültek előregyártott sóraktár épületek, ezek egyike a Milánói Nitrát Raktár, mely 37 m széles, illetve a már megemlített Tortonai Sóraktár. Ez utóbbi szerkezete kiselemes, bennmaradó zsákkal készült.

Hollandiában, Ymuiden-ben is készült egy 30 m széles csarnok: az ívek 3 m –re helyezkedtek el, a vasbeton oldalfalra terheltek. Helyszínen előregyártott szerkezete volt a csarnoknak, az íveket élükre állítva készítették el.

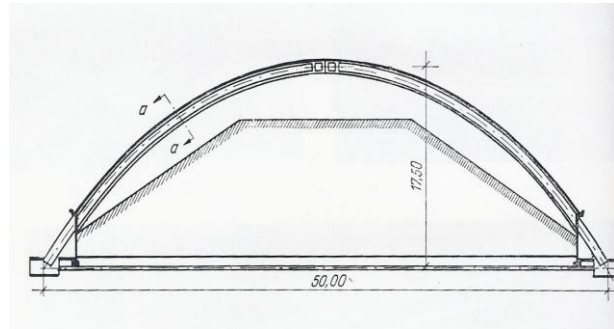
Az 1950-es évek végére már elterjedt volt az ívek előregyártása, 3 csuklós szerkezetből 2 csuklóssá alakítása. Különbséget az emelés technikája mellett a méretek mutatnak. Bratislava

környékén épült egy raktárépület, melynek féllíveit helyszínen állították össze 4 előregyártott elemből (8. kép). A csarnok szerkezeti vizsgálatával elvégezték a szerkezet monolitikus kialakításának számolását, anyagszükségletének kimutatását: a megtakarítás az előregyártás során jelentős: a betonban 59%, míg a betonacélban 35%.

Szintén az 1950-es években építették Krefeldben (9. kép) egy ammóniumszulfát-tároló csarnokot. Mivel nem tudtak megfelelő alapozást biztosítani a helyi talajviszonyok miatt, ezért a padló alatt vonórudas kialakítást képeztek.



398. ábra. Az emelés vázlatja



9. kép – Krefeld-i raktár

8. kép – Bratislava-i raktár

A Nervitől választott Tortonai sóraktár, illetve Gnädig kazincbarcikai épülete is illeszkedik a sorba, a tervezők a már korábban kimódolt keretek között, saját lehetőségeiket és tapasztalatukat mérlegelve, finom újításokkal, fejlesztésekkel egészítették ki a szerkezetet.



*Pier Luigi Nervi Tortonai Sóraktárát, valamint Gnädig Miklós alább bemutatandó épületeit a SketchUp nevű modellező szoftverben (CAD program) építettem meg. A modellezéssel az épületek szerkezetének minél jobb megismerése, illetve a vizsgált elemek illusztrálása volt a célom.*

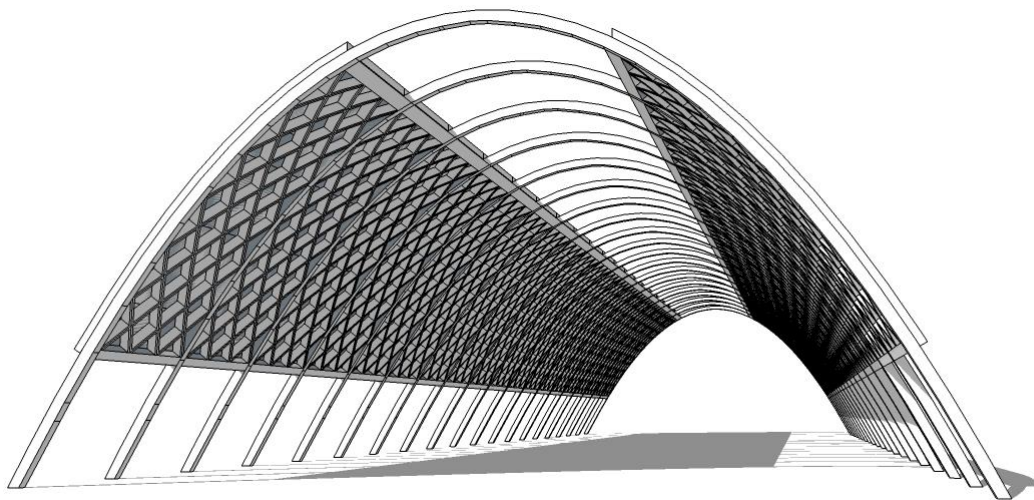
## Pier Luigi Nervi - Tortona, Sóraktár (1950-1951)

Nervi a torontai sóraktárat a torinói kiállítási csarnokok után tervezi meg, szerkesztési elve hasonló azokéhoz: előregyártott ferrocement kiselemekből állítja össze a parabolikus héjelemeket, melyek végső teherbírásukat a kiálló vaselemek összehegesztése, kibetonozása után nyerik el.

A kor jellemzője, hogy bár a mértékadó terhelés következtében – mely az ilyen nagyságú csarnokoknál az önsúly – láncgörbe alakú ívszerkezet kialakítása az optimális teherhordás szempontjából, mégis parabolikus ívszerkezeteket terveznek, gyártanak, melyeknek mind számítása, mind kivitelezése egyszerűbb.

Mivel jelentős szakirodalom áll rendelkezésünkre az épület szerkezetéről, elemzéseiről, a dolgozat ezt nem tárgyalja részletesebben, mindazonáltal az épület jelentősége kettős: fontos egyrészt, mert a mérnök életművének fejlődési sorába beilleszthető, illetve tipológiája a hasonló funkciójú szerkezetekre reflektál.

Magyar vonatkozásban is kettős szerepe van: közös pontot nyújt Gnädig Miklós két épületéhez: a Kazincbarcikai Sóraktárhoz és a Vörös Csillag Traktorgyárhoz, előzőnek tipológiai hasonlóságuk miatt, utóbbinak a kiselemes előregyártott elemek alkalmazásával mutatott párhuzamok miatt.



## Kazincbarcikai Műtrágya Raktár

*A Műtrágya Raktárat a nehezen hozzáférhető tervanyag és a jelentősége miatt személyesen látogattam meg. Köszönet Kristóf Gábornak a helyszíni körbevezetésért, a rendelkezésre álló dokumentumok előkereséséért.*



### A szerkezet ismertetése

A raktárépület a műtrágyagyár egész éves termésének tárolására épült. A funkciója miatt tengelyében, az egyik végfallal összeépítve lépcsőházzal, emelőszerkezettel készült egy fejpület, mely egyben merevíti is az épületet. A felülvilágítók sávjában készült el egy szalagpálya az anyag beszállítására, ugyanebben a tengelyben a padlóba süllyesztve egy másik szalagpályán át vitték ki a terméket a csarnokból.

A Sóraktár szerkezetét teljes helyszíni előregyártással készítették, az elkészült elemekből háromcsuklós szerkezetet készítettek, majd kétcsuklóssá alakították azt. A tetőelemek is nagyméretű, bordázott előregyártott vasbeton elemek voltak.

A szerkezet 46,15 m széles, az ív 24,4 m magas, ezzel az akkori magyarországi héjszerkezetek között a legnagyobb, tipológiájában pedig világszerte a legnagyobb méretekkel kialakított sóraktár. Nervi 2 évvel korábban tervezett Torontai Sóraktára csupán 25 méter széles és 12 méter magas!

A Sóraktár helyszínen előregyártott rácsos tartós ívszerkezete a tervek szerint a gyártás és beemelés fázisában háromcsuklós, majd végleges állapotában kétcsuklós, vonórúd nélküli ívként működött.

Bár Magyarországon ilyen méretekkel, előregyártott elemekből épített csarnokszerkezet ez előtt nem épült, az 1950-es évekre már előnyben részesítették mind az íves szerkezetek használatát bizonyos fesztávok után, mind pedig azoknak 2 csuklós megoldását. Rendszerint utóbbit úgy oldották meg, ahogyan Gnädig Miklós a Kazincbarcikai Sóraktárnál: 3 csuklós szerkezetet utólag alakítottak át 2 csuklóssá. Ez a megoldás a statikailag határozott tartóból statikailag határozatlan tartót készít, melynek már akkor ismertek voltak előnyei: merevebbnek, széltehernek jobban ellenállónak vették a korabeli mérnökök.

Ez a szerkezeti megoldás a kivitelezés során is előnyt jelentett: a sóraktár „félíveit” fekvő állapotban gyártották le, majd ezeket élükre állították. Ezen folyamat alatt a félív először 3 ponton, majd csak 2 ponton volt terhelt. Az ekkor fellépő igénybevételekből többletvasalásra nincs szükség, ahogyan a felemelés során se keletkeznek akkora igénybevételek, hogy arra külön méretezni kellett volna a tartót. Ha azonban a szerkezet nem 3 csuklós kialakítással épült volna fel, akkor a határozatlan tartószerkezetben mind az élére állításakor, mind a felemeléskor kialakultak volna olyan igénybevételek, melyek többlet vasalást igényeltek volna, ami a kivitelezés után már kihasználatlan volna.

Bár Kazinczy Gábor már az 1940-es években vizsgálta a vasbeton képlékenyedését, ennek hatásait a tartószerkezetek teherbírására, a képlékenységtannal történő méretezés, így a képlékeny csuklók szerepe, a képlékenytartaléknak a figyelembe vétele csak később válik elterjedté. (Kazinczy Gábor: Az anyagok képlékenysége jelentősége a tartószerkezetek teherbírása szempontjából. Budapest: Egyetemi Ny, 1942-1943.) Ezért feltételezzük az alábbi számításainkban a rugalmas méretezési eljárást.

Az ívszerkezeteknél tehát két fontos tényezőt kell figyelembe venni: az ív alakját, melyet a mértékadó terhelés mellett a funkcionális (termék, raktározásának típusa), esztétikai szempontok is befolyásolnak, illetve a szerkezet csomópontjainak kialakítását.

#### Az ívszerkezet alakjának optimalizálása

A korabeli források alapján a Kazincbarcikai Sóraktár ívét hol parabolikus, hol kötélánc ívként írják le.

Az ilyen típusú szerkezeteknél a mértékadó terhelés a következőképpen határozza meg a tartó alakját: önsúly teher esetén koszinusz hiperbolikus, míg hőteher esetén parabola alakú ívet kell készíteni.

Mivel a parabola ívnek a tervezése, kivitelezése is sokkal egyszerűbb, ezért gyakran eltekintettek ennek az elvnek a követésétől, és általában parabolikus szerkezeteket építettek.

Vizsgáljuk meg, hogy melyik a domináns teher:

Mértékadó teher számítása

Hóteher:

$$s_k = \mu_i * s_{k,1} = 0,8 * \left(2 - \frac{47,88}{30}\right) * 1,25 = 0,404 \text{ kN/m}^2$$

a  $\mu_i$  kiszámolásánál a következő közelítést alkalmaztam, a biztonság javára:

[ábra]

$$s_d = 1,5 * 0,404 * 9 * 46,5 = 253,11 \text{ kN}$$

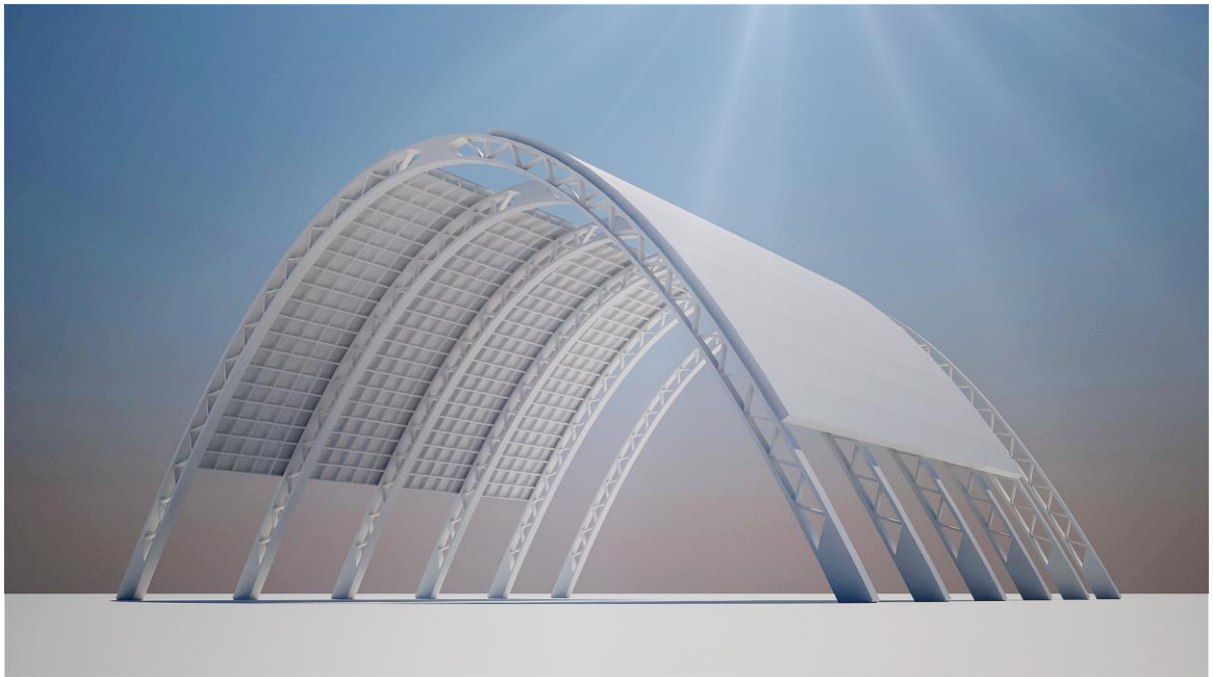
Tetőelem súlyából származó állandó terhelés:

$$p = n_{tetőelem} (V_{tetőelem} * \rho_c) = 2 * 23 * 1 * 9 * 0,04 * 25 = 414 \text{ kN}$$

$$P_{ív} = 2 * 400 = 800 \text{ kN}$$

$$p_d = 1,35 * (414 + 800) = 1638,9 \text{ kN}$$

Az egyszerűsített számítás eredménye egyértelmű: az önsúlyterhet kell figyelembe venni, azaz az ívnek koszinusz hiperbolikus szerkesztésűnek kellene lennie.



## Felső csomópont vizsgálata

Az előregyártott szerkezeteknél tervezési és kivitelezési oldalról is az egyik legbonyolultabb, de ugyanakkor legfontosabb feladat a kapcsolatok kialakítása.

A csomópontoknak - a kivitelezés függvényében – a lehető legpontosabbnak kellett lenniük, szerepük jelentősen befolyásolja a szerkezetek erőjátékát. Éppen ezért már a korabeli elvek is az egyszerűbb, kis munkai igényű megoldásokat részesítették előnyben.

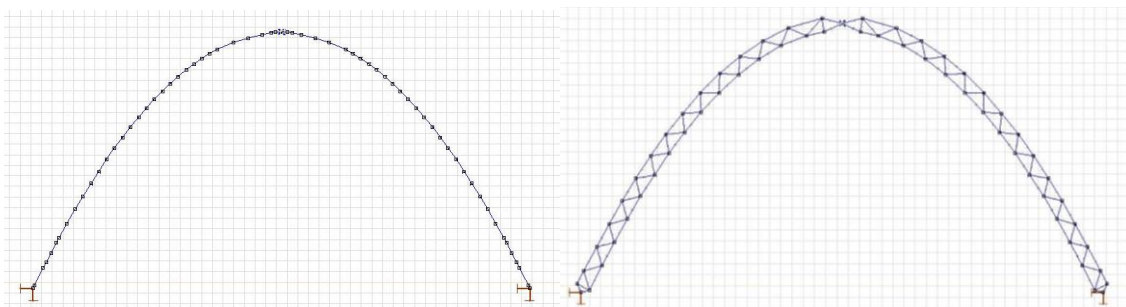
A fent leírtak alapján lényeges a tartószerkezet működésének szempontjából a felső csomópont erőjátéka. Ezt a mai számítási módszerekkel a következőképpen ellenőrizhetjük:

Adott a szerkezet geometriája, terhelés, illetve a vasalása, anyagminősége.

A szerkezet geometriája, a ráható terhek ismeretében számolható a felső csomópontban keletkező nyomatékok nagysága, míg az anyagminőség, a vasalás függvényében a keresztmetszet által számolható a kapcsolat merevsége.

### I. Nyomatékok számítása – különböző merevségek mellett

A szerkezet geometriai kialakítása döntő szerepet kap - dolgozatomban az ív összetett keresztmetszetét, geometriáját 2 féle közelítéssel modellezem meg: a keresztmetszetet az első esetben egy tömör beton szerkezettel közelítem, míg a második esetben figyelembe veszem a szerkezet rácsos tartós kialakítását.



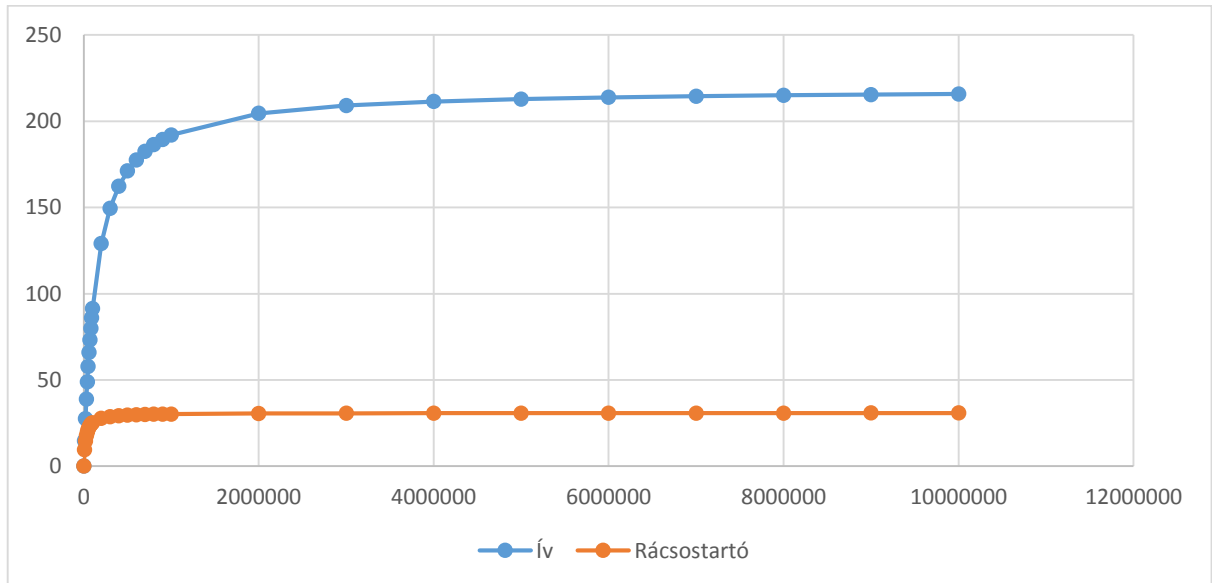
Számításaimat AxisVM programmal végeztem el a következő módon:

A geometria, keresztmetszeti adatok, terhelések (önsúly, hőteher) megadása után mindkét esetben a felső csomópontot – a két félvív csatlakozását normál erőre, nyíróerőre végtelen merev rugóval modellezem, míg a tartó síkjára merőleges tengelyre elhelyezett rugó merevségét változtatom.

Ezáltal meghatározható a csomópont  $M - \rho$  diagramja, melyen jól látható, hogyan változik a különböző rugómerevségek függvényében a szerkezet csomópontjában ébredő hajlítónyomaték nagysága. A nyomatéki teherbírás változása szemléletes mutatja az átmenetet a csuklós kialakítástól, ahol  $M=0$  egészen a merev kialakításig.

1. Ívszerkezet tömör keresztmetszettel

2. Rácsos tartós kialakítás



A kapott eredményekből jól látható, hogy valóban a rácsos tartós kialakítás az előnyösebb, hiszen kisebb nyomatékok ébrednek a vizsgált csomópontban ugyanakkora terhelés mellett.

## II. Keresztmetszet ellenőrzése

A felső csukló kialakításáról rendelkezésre álló adatok, méretek alapján (tervek, építkezésen készített fotók) közelítéssel a következő geometriájú, vasalású csomópontot elemeztem:



nyomott, húzott vasalás is: 12 db  $\square$  12-es betonacél

betonminőség: B300  $\rightarrow$  C16/20 osztály (biztonság javára közelítünk)

$$f_{uc,cube} = 0,92 \left( 1,06 \frac{300}{10} - 4,4 \right) = 25,2 \frac{kN}{mm^2} \geq 25 \frac{kN}{mm^2}$$

A számításokat II. feszültségi állapotban végeztem el, a következő módon: adott a vasalás, betonminőség, szerkezet mérete, így a nyomott betonkeresztmetszet méretei megállapíthatóak.

Statikai nyomatékok a semleges tengelyre:

$$\frac{bx_c^2}{2} + n * A'_s(x_c - d') - n * A_s(d - x_c) = 0 \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$\frac{bx_c^2}{2} + 2n * A_s(x_c) - n * A_s(d + d') = 0$$

$$\frac{800x_c^2}{2} + 2 * 6,896 * 1357(x_c) - 6,896 * 1357(1400) = 0$$

$$x_c = 159,08mm$$

Mivel  $x_c \leq d'$ , ezért a következő módosítások szükségesek:

$$\frac{bx_c^2}{2} - n * A'_s(x_c - d') - n * A_s(d - x_c) = 0$$

$$\frac{bx_c^2}{2} - n * A_s(d - d') = 0$$

$$\frac{800x_c^2}{2} - \frac{200}{29} * 1357 * 600 = 0$$

$$x_c = 118,48mm$$

Inercia, majd a feszültség számítása:

$$I_z = \frac{bx_c^3}{3} + n * A'_s(x_c - d')^2 + n * A_s(d - x_c)^2$$

$$I_z = \frac{800 * 118,48^3}{3} + 6,896 * 1357(118,48 - 400)^2 + 6,896 * 1357(1000 - 118,48)^2 = 8456,94 * 10^6 mm^4$$

$$\sigma_c = \frac{M}{I_z} * x_c = \frac{200 * 10^6}{8456,94 * 10^6} * 118,48 = 2,8019 N/mm^2$$

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{2,8019}{29} = 0,0966$$

Ezek után már számítható a görbület, majd a rugómerevség:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_c} = \frac{0,0966}{118,48} = 8,1549 * 10^{-4} \frac{1}{mm}$$

$$\varphi = a * \kappa = 1000 * 8,1549 * 10^{-4} = 0,8154$$

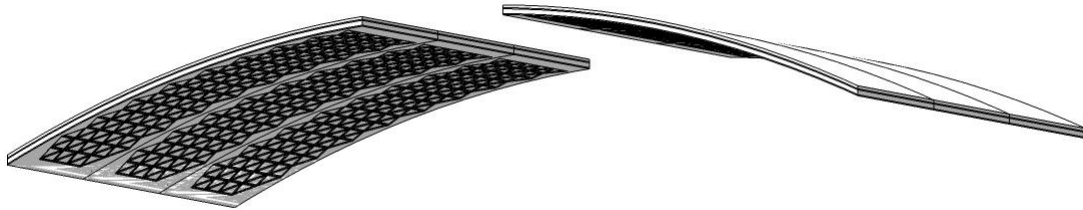
$$\rho = \frac{M}{\varphi} = \frac{200 * 10^6}{0,8154} = 245,25 * 10^6 Nmm$$

### III. A keresztmetszet adatainak visszavezetése a szerkezet elemzésének eredményeire

A közelítő számítás végeredménye, hogy a fenti csomópont kialakítása valóban merevnek tekinthető, bár az anyagminőség, szerkezeti méretek csak közelítő adatokkal voltak vizsgálva, illetve az akkori kivitelezés – betonvasak helyszíni hegesztése, beton helyszíni bedolgozása - még kisebb pontossággal bírt.



## Vörös Csillag Traktorgyár (1962)



### A szerkezet ismertetése

A Gnädig Miklós, Kollár Lajos által tervezett szerkezetre azért volt szükség, mert a korábbi csarnok tetőszerkezete technológiai, tűzvédelmi, világítási szempontból nem volt már kielégítő. A tervezés során fontos szempont volt, hogy a csarnokban működő üzemet minél kevésbé akadályozzák, ez előre korlátozta az állványzat, zsaluzat kialakítását.

A nagy fesztáv miatt héjszerkezetet találtak gazdaságosnak a tervezők, melyet acél rácsos tartó merevített. A világítás problémáját hernyó alakú felülvilágítóval oldották meg, mely alatt vasszerkezet váltotta ki a vasbeton héjat.

Maga a vasbeton szerkezet 90 cm oldalhosszúságú, 4 cm lemezvastagságú, 17,5 cm bordamagasságú előregyártott, kiselemes háromszögekből készült, a Nervinél már megismert módon teherbírását az utólagos vasszerelések, rábetonozás után nyerte el. A szerkezet 5 méterenként függőleges síkban merevítve van, acél rácsostartókkal, melyek felső öve a héjszerkezet monolit kialakítású sávja. Az acélszerkezet alsó öve szintén íves kialakítású, így a rácsrudakban különböző tehereloszlás esetén is kizárólag húzás ébred. Ennek köszönhetően a rácsrudak keresztmetszeti mérete jelentősen csökkenthető volt. Maga a vasbeton szerkezet membrán erőjátékú, rövidebb híd, peremtartói a szemöldökgerendák és az ívek.

A szerkezetválasztást tehát funkcionális és kivitelezési igények motiválták, a szerkezet alakját pedig szilárdsági- és stabilitási követelmények. A membrán erőjáték elérésével párhuzamosan, részben azt szolgálva, fontos cél a héjvastagság minimalizálása. Ezeket az elveket Nervi épületeinél is láthattuk, a kiselemes szerkesztés során általában a stabilitási követelmény a mértékadó, azaz a horpadásra kell méretezni. A kis vastagságot az elemek

között kialakuló bordák merevsége ellensúlyozza. Így alakul ki a Nervi védjegyévé vált bordás héj.

A héjvastagság növelésével a horpadási kritikus erő nő, de ezzel együtt az elemek önsúlyterhe is. A Vörös Csillag Traktorgyár szerkezetének újítása ebben rejlik tehát: az Újpesti Bőrenyógyárnál Gnädig még kedvezőtlen geometriájú téglabéléstesteket használt, ennél az épületnél azonban már előregyártott vasbeton elemeket, melyek geometriája a fentiek alapján kialakított. Az utólagos kibetonozással egy olyan borda-rendszert hozott létre, mely a héjat merevíti, ugyanakkor a panelek vastagsága minimális nagyságú, így önsúlyterhük is kevés lesz. Természetesen a paneleket egyedileg horpadásra kellett méretezni.

A kiselemes szerkesztés tehát nagyban segítette a szerkezetek alakjának optimális kialakítását. Az elemméret megfelelő megválasztása lehetővé teszi a membrán erőjátékhoz szükséges héjgeometria pontos lekövetését, illetve optimalizálja maguknak az elemeknek a geometriáját: a kis vastagság az önsúly minimalizálására – bordák a szükséges merevség biztosítása végett. A kivitelezés szempontjából is előnyös a kiselemes megoldás, hiszen beemelésük, gyártásuk könnyebb.

A dolgozatomban ezt a két aspektust (önsúly minimalizálása vs felület lekövetése) vizsgálom meg számítógépes modellek segítségével, rekonstruálva a tervezési folyamatot, mai eszközökkel. Az eredményeket összevetve képet kaphatunk arról, hogy az akkori és a mai technológiák milyen viszonyban állnak egymással.

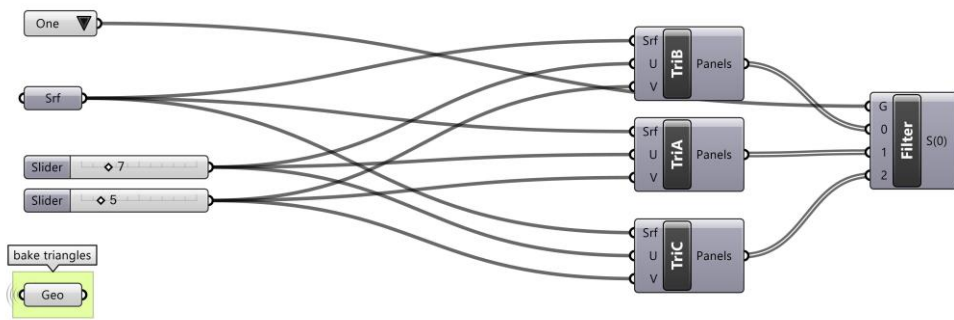
Kedvező geometria, kiselemekkel történő közelítés

A számítógépes szoftverek nagyban segítik a héjszerkezetek alakjának sík elemekkel való közelítését. Dolgozatomban 3 módszert ismertetek erre, mindegyikhez a Rhinoceros 3D nevű, NURBS alapú CAD programot, illetve ennek parametrikus kiegészítőit használtam.

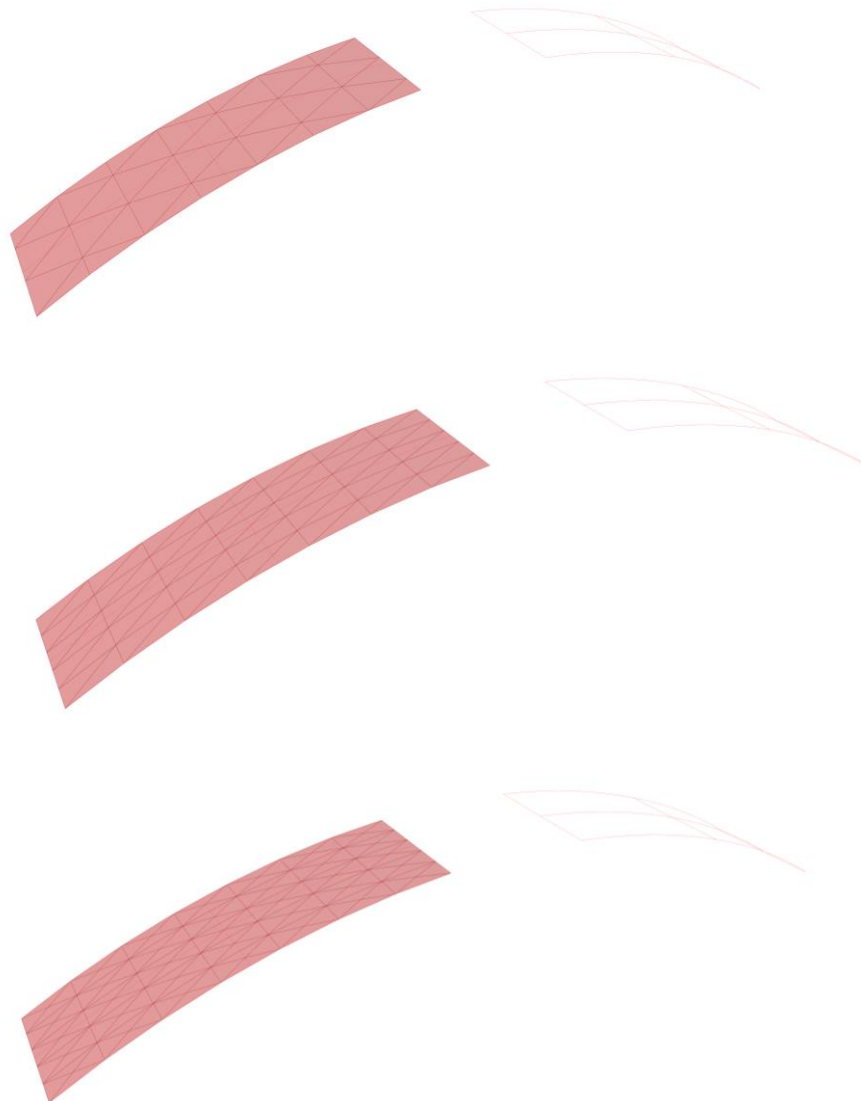
#### 1. Rhino – Grasshopper alkalmazása

A Grasshopper segítségével egyszerűen tudunk több típusú elemmel a héjszerkezetek alakjához közelíteni. Ennek egyik módja a Lunchbox nevű plug-in használata, mely számtalan formájú elemet tartalmaz. A Traktorgyár háromszög alakú panelekből épült, így én is a háromszög elemekkel történő közelítést vizsgáltam.

Ehhez a következő programsort készítettem:

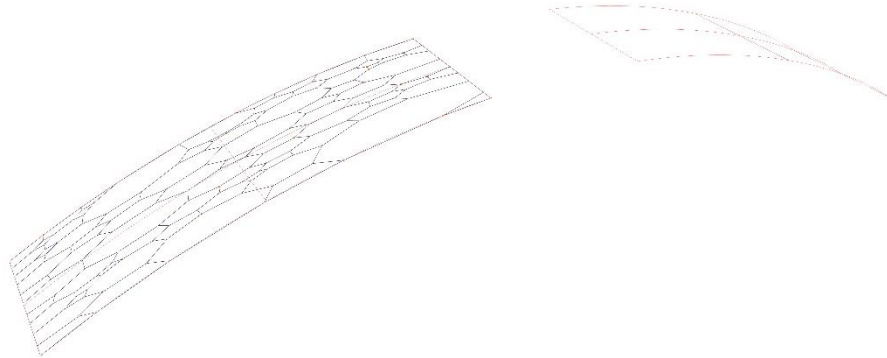


A három típusú háromszögekiosztás mellett az elemek oldalhosszait különböző méretekben adhatjuk meg, így esetünkben például a horpadásra már méretezett háromszögek geometriájának megadásával a következő elrendezések közül választhatunk:



## 2. Rhino – Eve\_voronax plug-in alkalmazása

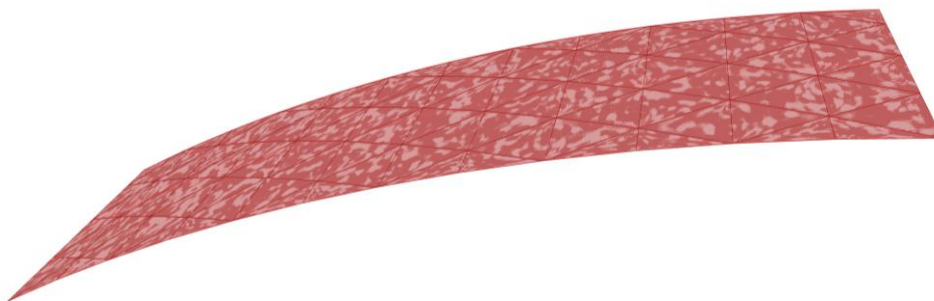
Az eve\_voronax elnevezésű plug-in-t a Programming Architecture iroda fejlesztette ki. Ennek segítségével szintén különböző alakú elemekkel közelíthetünk a héj alakjához. Felhasználói felülete egyszerűbb, a kiválasztott elem után megadhatjuk, hogy az elemek egységes méretűek, alakúak legyenek, vagy különböző méretekkel ériék el a legoptimálisabb közelítést.

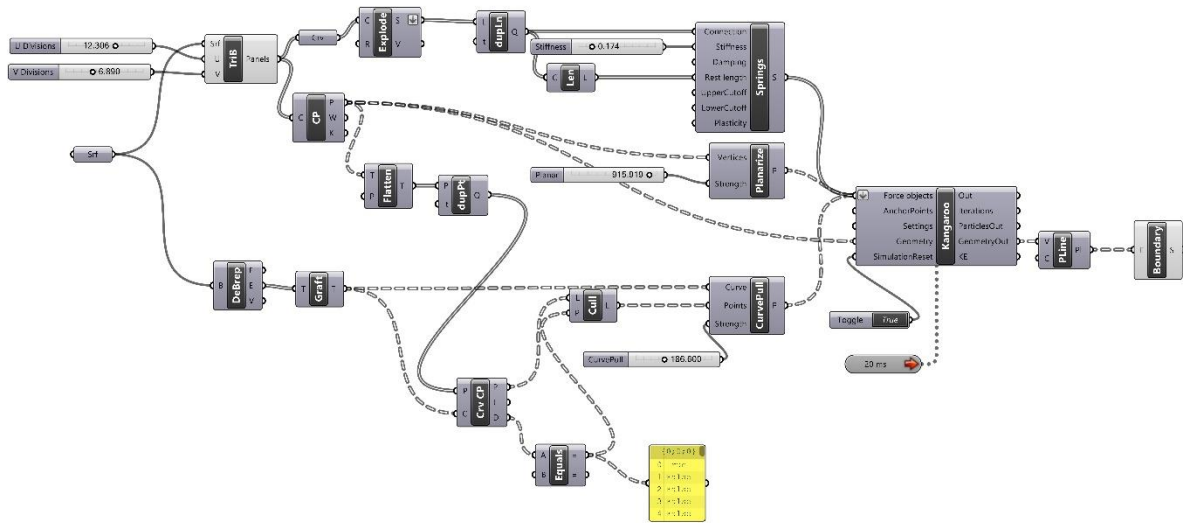


## 3. Rhino – Grasshopper alkalmazása – optimális elemméret keresése Kangaroo-val

Az első módszertől alapvetően abban különbözik, hogy nem ugyanakkora elemekkel közelít, így tulajdonképpen ötvözi az első két megoldás előnyeit: szabadabban választható meg a felhasznált elem típusa, mérete is.

A Rhino – Grasshopper együttes alkalmazása lehetővé teszi a megírt algoritmus használatát különböző felületre, mely több szerkezet vizsgálatánál szintén nagy előnyt jelenthet.





Felület felvételével kezdődik a számítás, majd az algoritmus legfontosabb lépései a következők:

1. Héj peremeinek felosztása
2. Lunchbox plug-in – panelelemek megadása: háromszög, téglalap, rombusz, hatszög stb.
3. Forces – erők megadása
  - a. springs – rugó/rugómerevség
  - b. planarize - síkbeli közelítés a héjelemhez
  - c. curvepull – peremek meghatározására (héjelem végei), rögzítése
4. Kangaroo
  - a. erők összegzésének megadása (egy listára rendezés)
  - b. geometria megadása

A program lehetőséget biztosít az optimalizálási folyamat végig követésére, így ezt a funkciót is hozzá csatolva az algoritmusunkhoz nyomon követhetjük az ideális alakzat megtalálásának folyamatát.

A Rhino előbb ismertetett megoldási lehetőségei nagyrészt a geometria optimalizálását oldják meg, ám több plug-in (többek között végeselemes szimulációt is lehetővé tevő), illetve a Rhino Vault használatával komolyabb szilárdságtani számítások is elvégezhetőek

## Összegzés

A fenti számítások bebizonyították, hogy a korabeli számítások, elvi meggondolások a mai napig megállják a helyüket. A számítógépes modellezés eredménye egyértelműen igazolta a mérnökök kézi számításából, szakmai tapasztalatukból elvi alapon történő modellezésének helyességét.

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni Bartók Istvánnak, az Ipar és Mezőgazdasági Épülettervezési Tanszék oktatójának segítségét, illetve Kristóf Gábornak, a BorsodChem telephely-gazdálkodási irodavezetőjének segítségét is, aki lehetővé tette a Kazincbarcikai Sóraktár megtekintését, és további forrásokat biztosított számomra.

## Források

- [1] Csonka Pál: Héjszerkezetek. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981
- [2] Mók László: Helyszíni előregyártás – Ipari épületek, csarnokok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961
- [3] Pier Luigi Nervi: Aesthetics and Technology in Building. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1965
- [4] Pier Luigi Nervi: Progress Architecture Publ., Tokyo, 1981
- [5] Dr. Dulácska Endre: Kisokos statikusoknak. Artifex Kiadó, Budapest, 2013
- [6] Dr. Dulácska Endre: Vasbeton szerkezetek. BME Printer Nonprofit Kft., Budapest, 2012
- [7] Dr. Hegedűs István: Héjszerkezetek, egyetemi jegyzet
- [8] Magyar Építőipar, 1960, 1963-as évfolyamai